

(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
12 septembre 2002 (12.09.2002)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 02/071162 A1

(51) Classification internationale des brevets :
G05B 13/02, 13/04

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR02/00516

(22) Date de dépôt international :
12 février 2002 (12.02.2002)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
01/02788 1 mars 2001 (01.03.2001) FR

(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) : USI-
NOR (FR/FR); Immeuble "La Pacific", La Défense 7,
11/13, cours Valmy, F-92800 Puteaux (FR).

(72) Inventeur; et

(75) Inventeur/Déposant (pour US seulement) : MONARI,
Gaëtan (FR/FR); Quartier de la Ferrage, Avenue St
Vérédème, F-13430 Eyguieres (FR).

(74) Mandataire : LAGRANGE, Jacques; Immeuble "La Pa-
cific", TSA 10001, F-92070 La Défense Cedex (FR).

(81) États désignés (national) : AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ,
BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ,
DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM,
HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK,
LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX,
MZ, NO, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI,
SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VN,
YU, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (régional) : brevet ARIPO (GH, GM, KE,
LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), brevet
eurasian (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), brevet
européen (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR,
IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR), brevet OAPI (BF, BJ,
CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN,
TD, TG).

Publiée :
— avec rapport de recherche internationale

En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abrévia-
tions, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et
abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de
la Gazette du PCT.

(54) Title: METHOD FOR CONTROLLING AND DRIVING A TECHNICAL PROCESS

(54) Titre : PROCÉDE DE CONTRÔLE ET DE COMMANDE D'UN PROCESSUS TECHNIQUE

(57) Abstract: The invention concerns a method for controlling and driving a technical process executed in time by applying at each instant t instructions $C_i(t)$, leading to a measurable but not observable result $R(t)$ and generating a plurality of observable quantities distinct from the result $R(t)$ whereof at least two are independent $G_j(t)$, which consists in: measuring at least two independent observable quantities $G_j(t)$, $G_k(t)$; with a predictive model M , or a set of models, whereof the variables comprise the at least two independent observable quantities, calculating an estimation $R_{est}(t) = M(G_j(t), G_k(t))$ of the result $R(t)$; using a drive law L , whereof the input variable is the estimated result $R_{est}(t)$, calculating new instructions $C_i(t+1)$, applicable for time $t+1$; and replacing the instructions $\{C_i(t), C_n(t)\}$ by the instructions $\{C_i(t), C_n(t+1)\}$. The invention is applicable to spot welding.

(57) Abrégé : Procédé de contrôle et de commande d'un processus technique s'exécutant dans le temps en appliquant à chaque instant t des consignes $C_i(t)$, conduisant à un résultat $R(t)$ mesurable mais non observable et engendrant une pluralité de grandeurs observables distinctes du résultat $R(t)$ dont au moins deux sont indépendantes $G_j(t)$, selon lequel: on mesure au moins deux grandeurs observables indépendantes $G_j(t), \dots, G_k(t)$; à l'aide d'un modèle prédictif M , ou d'un comité de modèles, dont les variables comportent les au moins deux grandeurs observables indépendantes, on calcule une estimation $R_{est}(t) = M(G_j(t), \dots, G_k(t))$ du résultat $R(t)$; à l'aide d'une loi de commande L , dont la variable d'entrée est le résultat estimé $R_{est}(t)$, on calcule de nouvelles consignes $C_i(t+1)$, applicables pour l'instant $t+1$; et on remplace les consignes $\{C_i(t), \dots, C_n(t)\}$ par les consignes $\{C_i(t+1), \dots, C_n(t+1)\}$. Application au soudage par points.

WO 02/071162 A1

PROCÉDE DE CONTROLE ET DE COMMANDE D'UN PROCESSUS TECHNIQUE

La présente invention concerne un procédé de contrôle et de commande d'un processus technique s'exécutant dans le temps soit de façon continue soit de façon discontinue, le processus étant en particulier le soudage par points d'un assemblage de tôles.

Les processus techniques qui peuvent être contrôlés et commandés par des régulations sont très divers et se retrouvent dans toutes les industries. D'une façon générale, un processus transforme un objet, caractérisé par des grandeurs qui sont des grandeurs d'entrée pour le processus, en un autre objet caractérisé par des grandeurs qui sont des grandeurs de sortie pour le processus. L'exécution du processus peut être commandée par des grandeurs de consigne correspondant à des paramètres de réglage fixés par un opérateur ou par une régulation. D'une façon générale également, on souhaite qu'au moins une grandeur de sortie reste voisine d'une valeur visée, on dit alors qu'on contrôle cette grandeur. Pour atteindre cet objectif, obtenir une grandeur de sortie ayant une valeur voisine de la valeur visée, on ajuste les grandeurs de consigne. L'ajustement des valeurs de consigne à partir de la mesure de grandeurs caractéristiques du processus, ainsi que l'utilisation de ces mesures pour surveiller l'exécution de celui-ci, constitue le procédé de contrôle et de commande du processus. Il convient de noter que, si les grandeurs de sortie sont des variables indépendantes les unes des autres, on ne peut contrôler qu'une et une seule de ces grandeurs. On supposera donc par la suite qu'on ne contrôle qu'une seule grandeur de sortie, même si le processus peut être caractérisé par plusieurs grandeurs de sortie indépendantes les unes des autres. Par la suite, la grandeur de sortie à contrôler pourra aussi être appelée « résultat ». Enfin, l'exécution du processus peut être, en général, caractérisée par des grandeurs liées aux phénomènes mis en jeu par le processus; ces grandeurs ne sont ni des grandeurs d'entrée, ni des grandeurs de sortie.

Une grandeur d'entrée ou de sortie, ou toute autre grandeur associée au processus, peut ou non être mesurée et, si elle peut être mesurée, la mesure peut ou non être faite en temps réel sans perturber le processus. Par la suite, on appellera :

- « grandeur mesurable » une grandeur qu'on peut mesurer, c'est-à-dire à laquelle on peut faire correspondre une valeur numérique ; une telle grandeur n'est pas nécessairement mesurable en temps réel.
- « grandeur observable » une grandeur mesurable qui peut être mesurée directement sur le processus ou sur le produit directement issu du processus, en temps réel.

On connaît par exemple des procédés de contrôle et de commande d'un processus qui consistent à mesurer la grandeur de sortie à contrôler, à comparer cette mesure à la valeur visée, puis, en utilisant une loi de commande, à modifier les grandeurs de consigne. Un tel procédé suppose qu'on puisse mesurer en temps réel la grandeur de sortie considérée.

Dans une variante du procédé précédent, la grandeur à contrôler n'est pas mesurable en temps réel mais est corrélée de façon connue à une autre grandeur de sortie qui, elle, est mesurable en temps réel. Dans ce cas, on remplace la grandeur à contrôler par la grandeur de sortie mesurable et on régle cette dernière grandeur.

On connaît également des procédés de contrôle et de commande d'un processus qui consistent à mesurer les grandeurs d'entrée et à calculer les grandeurs de consigne en utilisant un modèle dont les variables sont les grandeurs d'entrée mesurées et la valeur de sortie visée. Ce modèle constitue alors la loi de commande ; il ne permet pas de calculer de valeur prévisionnelle pour la grandeur de sortie à contrôler. Un tel procédé suppose qu'on puisse mesurer les grandeurs d'entrée et qu'on dispose d'un modèle adéquat.

On connaît aussi des procédés de contrôle et de commande d'un processus qui consistent à mesurer les grandeurs d'entrée, à calculer à l'aide d'un modèle prédictif, dont les variables sont les grandeurs d'entrée et les grandeurs de consigne, une estimation de la valeur de la grandeur de sortie à contrôler, à comparer cette estimation à la valeur visée et à utiliser cette comparaison pour modifier les grandeurs de consigne en utilisant une loi de commande. Un tel procédé suppose qu'on puisse mesurer en temps réel les grandeurs d'entrée et qu'on dispose d'un modèle prédictif adéquat.

On connaît enfin des procédés de contrôle et de commande d'un processus qui utilisent un modèle permettant de calculer, à partir de la grandeur de sortie à

contrôler et des grandeurs de consigne, la valeur d'une grandeur de sortie, facile à mesurer, différente de la grandeur à contrôler, mais corrélée étroitement à celle-ci. Dans ce procédé, à partir de la valeur visée pour la grandeur de sortie à contrôler et des grandeurs de consigne, on calcule une valeur visée pour la grandeur de sortie
5 facile à mesurer, puis on compare la valeur mesurée de cette grandeur à la valeur visée, et à partir de cette comparaison, on modifie les grandeurs de consigne en utilisant une loi de commande. Ce procédé suppose notamment qu'on connaisse au moins une grandeur de sortie facile à mesurer, qui puisse être calculée à partir d'un modèle dont les variables sont la grandeur de sortie à contrôler et des grandeurs de
10 consigne.

Cependant, il existe des processus pour lesquels aucun de ces procédés de contrôle et de commande n'est applicable. C'est en particulier le cas du soudage par points d'un assemblage de tôles. En effet, dans ce processus, le résultat à obtenir ne peut être mesuré que par un essai destructif et ne peut donc pas être utilisé pour
15 contrôler et commander le processus en continu. D'autre part, le résultat dépend non seulement des grandeurs d'entrée et de consigne, mais également de l'usure du dispositif utilisé pour effectuer le soudage. Or, on ne connaît pas de moyen fiable pour mesurer l'usure du dispositif. On ne peut donc prévoir à partir des grandeurs d'entrée et de consigne, ni la qualité de la soudure, ni tout autre grandeur de sortie
20 qui, à elle seule, serait représentative de la qualité de la soudure. Enfin, on ne connaît pas une grandeur de sortie corrélée étroitement au résultat à contrôler.

Il existe donc des processus, et le soudage par points en est un exemple, dont les grandeurs d'entrée, les grandeurs de sortie et les consignes ne permettent pas de mettre en œuvre les procédés de régulation connus.

Le but de la présente invention est de remédier à cet inconvénient en proposant un moyen pour contrôler et commander en continu un processus technique tel que le soudage par points dans lequel il n'est pas possible d'observer (au sens défini ci-dessus) le résultat obtenu, et pour lequel ce résultat ne peut pas être prévu à partir des seules mesures des grandeurs d'entrée mesurables ou d'une
30 seule grandeur de sortie mesurable.

A cet effet, l'invention a pour objet un procédé de contrôle et de commande d'un processus technique s'exécutant dans le temps, soit de façon continue soit de

façon discontinue, en appliquant à chaque instant t des consignes $\{C_1(t), \dots, C_n(t)\}$, conduisant à un résultat $R(t)$ mesurable mais non observable qu'on souhaite maintenir proche d'une valeur visée R_v , et engendrant une pluralité de grandeurs observables dont au moins deux sont indépendantes $\{G_1(t), \dots, G_m(t)\}$, selon lequel :

- 5 - on mesure au moins deux grandeurs observables indépendantes $G_1(t), \dots, G_p(t)$,
- à l'aide d'un modèle prédictif M , ou d'un comité de modèles, dont les variables d'entrée comportent les au moins deux grandeurs observables indépendantes et éventuellement au moins une consigne $C_1(t), \dots, C_q(t)$, on calcule une estimation $R_{es}(t) = M(G_1(t), \dots, G_p(t), C_1(t), \dots, C_q(t))$ du résultat $R(t)$,
- 10 - à l'aide d'une loi de commande L dont la variable d'entrée est le résultat estimé $R_{es}(t)$ et le résultat visé R_v , on calcule de nouvelles consignes $\{C_1(t+1), \dots, C_n(t+1)\} = L(R_{es}(t), R_v)$ applicables pour l'instant $t+1$,
- et on remplace les consignes $\{C_1(t), \dots, C_n(t)\}$ par les consignes $\{C_1(t+1), \dots, C_n(t+1)\}$,

Le modèle prédictif M peut être un modèle d'ajustement statistique dépendant de
 15 paramètres $\{\theta_1, \dots, \theta_p\}$, qui constituent un vecteur paramètres θ , ajustés sur une base d'apprentissage B_{ap} constituée de l'ensemble des consignes, des mesures des grandeurs observables et de la mesure du résultat pour une pluralité d'exécutions successives du processus technique.

Pour déterminer le modèle M , on peut, par exemple, procéder de la façon
 20 suivante :

- on choisit une structure de modèle dépendant d'un vecteur paramètre θ ,
- on choisit une fonction de coût J ayant par exemple une forme quadratique,
- avec la base d'apprentissage, on calcule une succession de modèles ajustés $M_{a,k}$ correspondant à différents vecteurs paramètre θ_k de dimension q_k qui minimisent,
 25 globalement ou localement, la fonction coût sur la base d'apprentissage,
- pour chaque modèle $M_{a,k}$, on calcule les coefficients h_i de chacun des exemples de la base d'apprentissage, et on calcule le score généralisé du modèle $M_{a,k}$:

$$E(\theta_{a,k}) = \sum_{i=1,N} [(M_{a,k}(x^i; \theta_{a,k}) - R_i) / (1 - h_i)]^2$$

- et on calcule une grandeur $\mu(\theta_{a,k}) = (N \cdot q_k)^{-1/2} \sum_{i=1 \text{ à } N} h_i^{1/2}$ et on choisit le modèle
 30 $M_{a,k}$ ayant le plus grand $\mu(\theta_{a,k})$ parmi les modèles ayant les plus petits $E(\theta_{a,k})$; ce modèle est le modèle optimal $M_{a,opt}$.

De préférence :

- on détermine pour la mesure du résultat R un intervalle de dispersion $[\sigma_{\min}, \sigma_{\max}]$ de l'écart type de l'erreur de mesure,
- 5 - et on ajuste les paramètres $\{\theta_1, \dots, \theta_p\}$ du modèle prédictif M de telle sorte que, sur une base de test B_{test} , il ait un score S tel que $\sigma_{\min} < S < \sigma_{\max}$, la base de test étant constituée de l'ensemble des consignes, des mesures des grandeurs observables et de la mesure du résultat pour une pluralité d'exécutions successives du processus technique, différente de la base d'apprentissage.
- 10 Pour ajuster les paramètres $\{\theta_1, \dots, \theta_p\}$ du modèle prédictif M, on peut choisir une première base d'apprentissage B_{ap} et une première base de test B_{test} et procéder comme suit : à l'aide de ladite première base d'apprentissage on détermine une première estimation des paramètres $\{\theta_1, \dots, \theta_p\}$, de telle sorte que le score du modèle M pour la base d'apprentissage soit compris dans l'intervalle de
- 15 dispersion $[\sigma_{\min}, \sigma_{\max}]$, puis, en utilisant dans le modèle M cette première estimation des paramètres, à l'aide de la première base de test B_{test} , on évalue le score S qu'on compare à l'intervalle de dispersion $[\sigma_{\min}, \sigma_{\max}]$, si S est à l'intérieur dudit intervalle de dispersion, on considère que l'estimation des paramètres est satisfaisante, dans le cas contraire, on complète la base d'apprentissage B_{ap} avec
- 20 des exemples issus de la première base de test pour constituer une nouvelle base d'apprentissage, éventuellement on complète la base de test et on détermine à nouveau les paramètres $\{\theta_1, \dots, \theta_p\}$ à l'aide de la nouvelle base d'apprentissage et le score S sur la nouvelle base de test, et on poursuit les itérations jusqu'à ce que le score S soit compris dans l'intervalle de dispersion
- 25 $[\sigma_{\min}, \sigma_{\max}]$.

Pour compléter la base d'apprentissage avec des exemples issus de la base de test on peut:

- fixer un seuil d'intervalle de confiance Sk pour les prédictions du modèle,
- calculer l'intervalle de confiance Ik de la prédiction du modèle M, pour chacun
- 30 des exemples de la base de test
- et introduire dans la base d'apprentissage tous les exemples de la base de test dont l'intervalle de confiance Ik est supérieur à Sk.

Au cours de l'exploitation du processus, on peut mesurer au moins un résultat et les grandeurs observables correspondantes de façon à déterminer au moins un exemple supplémentaire qu'on ajoute à la base d'apprentissage et, avec la nouvelle base d'apprentissage ainsi obtenue, évaluer la performance du modèle et, si

5 nécessaire, ajuster les paramètres du modèle.

Le modèle M est, par exemple, un réseau de neurones.

Le processus technique, peut, en particulier, être le soudage par points de tôles.

Dans ce cas, le résultat R est, par exemple, le diamètre Φ du bouton de soudage et les consignes C_1, \dots, C_n , sont la force de soudage F_s , l'intensité de soudage I_s , le

10 temps de soudage Δt_s et le temps de forgeage Δt_f . Les grandeurs observables sont, par exemple, l'énergie électrique totale E_t , la dilatation maximale en cours de soudage Δz_s et la contraction maximale pendant la phase de forgeage Δz_f .

La loi de commande L peut être définie de la façon suivante:

- on choisit une valeur minimale Φ_{\min} et une valeur maximale Φ_{\max} pour le diamètre
- 15 du bouton de soudage,
- on choisit un nombre q_m ,
- on effectue la moyenne glissante Φ_{mg} des q_m dernières prédictions du diamètre du bouton de soudage Φ ,
- si $\Phi_{mg} > \Phi_{\max}$, on diminue la consigne I_c d'intensité de soudage, si $\Phi_{\min} \leq \Phi_{mg}$
- 20 $\leq \Phi_{\max}$ on ne modifie pas la consigne I_c d'intensité de soudage, si $\Phi_{mg} < \Phi_{\min}$ on augmente la consigne I_c d'intensité de soudage.

On peut, en outre, fixer une valeur $R_0 < R_{\min}$, et, si la dernière prédiction du diamètre du bouton de soudage Φ est inférieure à Φ_0 , on augmente la consigne I_c d'intensité de soudage.

On peut, également, fixer un incrément ΔI_c d'intensité de soudage, et, lorsqu'on diminue ou augmente la consigne I_c d'intensité de soudage, on soustrait ou on

ajoute à I_c l'incrément ΔI_c .

De préférence, ce procédé est mis en œuvre par un ordinateur.

L'invention va maintenant être décrite plus en détails pour l'exemple du

30 soudage par points, en regard des figures annexées dans lesquelles :

- la Figure 1 est un schéma de principe du soudage par points de deux tôles,

- la Figure 2 est une vue schématique en coupe d'un bouton de soudage par points,
- la Figure 3 est une vue schématique en coupe d'un bouton de soudage après arrachement,
- 5 - la Figure 4 est un schéma montrant l'évolution du diamètre du bouton de soudage en fonction de l'intensité de soudage pour deux états d'usure des électrodes de soudage,
- la Figure 5 est un schéma montrant l'évolution de la consigne d'intensité de soudage en fonction du nombre de soudures réalisées,
- 10 - la Figure 6 représente de façon schématique l'évolution de plusieurs grandeurs caractéristiques du soudage au cours de la réalisation d'un point de soudure.

Le soudage par points est un procédé d'assemblage de deux tôles métalliques, connu en lui même. Deux tôles 1 et 2 (figure 1) sont disposées l'une sur l'autre dans
15 une zone de recouvrement marginal et serrées entre deux électrodes 3 et 3' reliées à un module de commande 4 comportant un transformateur relié à une source d'électricité 5. A l'aide des électrodes, on fait passer, pendant un temps limité, un courant électrique d'intensité I_c à travers la zone de contact 6 des tôles située entre les électrodes. Le passage du courant électrique dans la zone de contact 6
20 provoque un échauffement du métal qui fait fondre celui-ci en formant un noyau fondu 7 (figure 2) entouré d'une zone affectée par la chaleur 8 qui comporte des indentations 9 et 9' provoquées par la pression des électrodes. Après le passage du courant électrique, le noyau fondu 7 se solidifie et assure une liaison entre les deux tôles. En général, pour assembler les deux tôles, on réalise une pluralité de points
25 de soudure disposés le long de la zone de recouvrement des tôles.

L'ensemble, constitué par la zone fondue puis solidifiée 7 et la zone affectée par la chaleur 8, est appelé bouton de soudage.

La qualité du soudage, c'est-à-dire la résistance mécanique du bouton de soudage, est évaluée par le diamètre moyen de celui-ci. Pour mesurer ce diamètre
30 moyen, on prélève une portion de tôles soudées par points contenant un bouton de soudage, et on sépare les deux morceaux de tôle par arrachement. On obtient alors
(figure 3) une portion de tôle 1a contenant un trou 10 à peu près rond et une portion

2a contenant le bouton 8. Pour mesurer le diamètre Φ du bouton, on mesure le plus grand et le plus petit diamètre du bouton et on fait la moyenne arithmétique de ces deux mesures. Cette mesure est faite dans la gorge 16 qui se situe à peu près à l'interface entre les deux tôles. Ainsi, la qualité du soudage est une grandeur mesurable, la mesure de cette qualité étant le diamètre du bouton de soudage. A noter que la qualité du soudage peut également être mesurée par d'autres moyens, par exemple, par la mesure de l'effort d'arrachement du bouton de soudage ; l'homme du métier sait déterminer ces méthodes de mesure de la qualité du bouton de soudage. Mais, cette grandeur n'est pas observable au sens qui a été défini ci-dessus, puisque pour la mesurer il faut détruire la soudure, et par conséquent, il n'est pas possible de la mesurer en temps réel, c'est-à-dire au fur et à mesure que la soudure est réalisée.

Le processus de soudage comporte les étapes suivantes :

- mise en place des tôles entre les électrodes,
- accostage, opération consistant à rapprocher les électrodes de tôles et à serrer progressivement en faisant monter la force de serrage jusqu'à une valeur nominale,
- fusion du noyau fondu par passage du courant pendant un temps déterminé,
- forgeage par maintien de la force de serrage pendant un temps déterminé,
- relâchement du serrage par écartement des électrodes.

Chacune de ces étapes dure une fraction de secondes ou une seconde environ, le cycle complet durant quelques secondes.

La qualité du soudage, pour des tôles d'épaisseur et de nature données (nature du métal, présence ou non de revêtement, etc.), dépend des paramètres suivants :

- force F de serrage des électrodes contre les tôles,
- intensité du courant I_s de soudage,
- temps pendant lequel on fait passer le courant Δt_s ,
- temps pendant lequel on applique la force pour forger Δt_f ,
- état d'usure des électrodes.

Pour chacun de ces paramètres, sauf l'état d'usure des électrodes, on définit des valeurs de consigne qui sont celles qu'on doit réaliser à l'aide de la machine de soudage pilotée par ses automatismes.

On constate que, à force de serrage F , temps de passage du courant Δt_s et temps de forgeage Δt_f donnés, la qualité du soudage (mesurée par le diamètre du bouton Φ) varie avec le courant I_s (figure 4) en partant d'une valeur minimale Φ_{\min} pour atteindre une valeur maximale Φ_{\max} , lorsque le courant I_s passe d'une valeur I_{\min} à une valeur I_{\max} , valeur au delà de laquelle on observe un phénomène dit d'expulsion correspondant au fait que la fusion est trop importante, si bien que le métal fondu est expulsé sans que le diamètre du bouton augmente ; en fait, ce dernier diminue, comme l'indique la courbe 11.

Mais, le diamètre du bouton de soudage dépend également de l'usure des électrodes (qui se traduit, entre autres, par une augmentation du diamètre de leurs extrémités). Cette usure a pour effet de déformer la courbe diamètre du bouton = $f(\text{intensité})$ en la déplaçant vers les hautes intensités et en diminuant sa pente, comme cela peut se voir sur la figure 4, dans laquelle la courbe 11 correspond à une électrode neuve et la courbe 12 à une électrode usée. Pour l'électrode usée, le diamètre minimal Φ_{\min} correspond à une intensité $I'_{\min} > I_{\min}$ et le diamètre maximal Φ_{\max} correspond à une intensité $I'_{\max} > I_{\max}$; l'écart entre I_{\max} et I'_{\max} étant sensiblement supérieur à l'écart entre I_{\min} et I'_{\min} .

Pour que le soudage soit satisfaisant, il faut que le diamètre du bouton de soudage soit compris entre Φ_{\min} et Φ_{\max} , et que l'intensité soit inférieure à l'intensité pour laquelle le phénomène d'expulsion apparaît. Comme les électrodes s'usent au fur et à mesure qu'on réalise des soudures, pour garantir la qualité des points de soudure successifs, il faut, au moins, faire évoluer la consigne d'intensité au fur et à mesure que le nombre de points de soudure, réalisés avec les mêmes électrodes, augmente.

A la figure 5, on a représenté dans un diagramme « nombre de soudures/intensité », les courbes 13 et 14 représentant respectivement l'évolution de I_{\max} et I_{\min} en fonction du nombre de soudures (l'échelle de l'axe horizontal correspondant au nombre de soudures est arbitraire et choisi pour que les courbes 13 et 14 soient des droites, ce qui est purement formel).

Les courbes 13 et 14 délimitent un domaine 15 de soudabilité, dans lequel se trouvent les points de fonctionnement correspondant aux soudures successives repérées s_1 à s_9 . Ces points sont disposés « en escalier », ce qui correspond à la

façon habituelle de piloter une installation de soudage par points, connue sous le nom de "loi de déphasage". Comme, en réalité, les courbes 13 et 14 n'ont pas une forme connue convenablement, il convient de déterminer au bout de combien de soudures il est nécessaire de modifier la consigne d'intensité et dans quelle mesure.

5 C'est le but de la présente invention, appliquée au soudage par points, que de déterminer de façon automatique quand faire varier la consigne d'intensité, et de combien.

Afin de bien comprendre l'invention, on va maintenant, en regard de la figure 6, décrire plus en détails un cycle élémentaire de réalisation d'un point de soudure.

10 Sur la figure 6 on a représenté l'évolution dans le temps de deux grandeurs observables qui sont :

- la force F de serrage des électrodes contre l'assemblage à souder,
- l'écartement z des électrodes; cet écartement se mesure par la distance entre deux points de repère arbitraires A et A' définis sur chacune des électrodes (figure 1).

15 Ces deux grandeurs peuvent être mesurées en temps réel à l'aide de capteurs de force et de déplacement, qui équipent de façon connue la machine de soudage.

Sur la figure 6, on observe 6 phases successives qui sont :

- 1 : avant serrage des électrodes, la force est nulle et l'écartement a une valeur z_0 suffisante pour permettre de positionner les tôles à assembler entre les électrodes.
- 2 et 3 : accostage, les électrodes se rapprochent jusqu'à arriver au contact des tôles, la distance z décroît, puis la force augmente pour atteindre la force de consigne F_c et la distance z s'établit à une valeur z_1 correspondant au contact des deux tôles l'une sur l'autre,
- 4 : soudage, on fait passer le courant électrique avec une intensité de consigne I_c . Pendant cette phase, du fait de la dilatation des tôles résultant du chauffage engendré par le courant électrique, la force F augmente jusqu'à une valeur $F_{\max,s}$, l'écartement z entre les électrodes augmente jusqu'à une valeur z_2 ,
- 5 : forgeage, la force est maintenue mais l'alimentation en courant électrique est coupée, la force se stabilise à la valeur F_c et les électrodes se rapprochent

légèrement en formant des indentations dans les zones de contact avec les tôles, la distance z passe par un minimum z_3 ,

- 6 : fin du soudage, on écarte les électrodes pour dégager ou déplacer les tôles.

On voit également sur cette figure que les grandeurs F et z varient avec le temps.

- 5 A chaque instant, on peut mesurer $F(t)$ et $z(t)$. Par des mesures électriques connues en elles-mêmes, on peut également mesurer l'intensité instantanée $i(t)$ et la tension instantanée $u(t)$ pendant la phase 4.

Pour piloter le processus de soudage, on fixe les grandeurs de consigne que sont la force F_c et l'intensité I_c ainsi que les durées de soudage Δt_s et de forgeage Δt_f .

- 10 Par un traitement informatique adéquat, que l'homme du métier sait réaliser, des mesures $F(t)$, $z(t)$, $i(t)$ et $u(t)$, on peut déterminer, après la réalisation d'un point de soudure, des grandeurs qui sont observables, au sens qui a été défini précédemment.

Ces grandeurs observables sont par exemple :

- 15 - la force maximale de soudage $F_{\max,s}$,
 - la dilatation maximale au cours du soudage $\Delta z_{\max,s} = z_2 - z_1$,
 - la rétraction maximale au cours du forgeage $\Delta z_{\max,f} = z_2 - z_{3g}$
 - l'énergie électrique totale consommée $E_{\text{élec}} = \int u(t).i(t).dt$, (l'intégration est faite sur la durée du soudage).

- 20 Il est à noter que, dans ce processus, les grandeurs observables qui viennent d'être définies ne sont ni des grandeurs d'entrée, ni des grandeurs de sortie, ni des consignes.

A partir de ces grandeurs observables, et notamment à partir des grandeurs $\Delta z_{\max,s}$, $\Delta z_{\max,f}$ et $E_{\text{élec}}$, on peut calculer une valeur prévisionnelle du diamètre Φ_p du

- 25 bouton de soudage. Pour calculer Φ_p on utilise un modèle M ayant pour variables les grandeurs mesurables $\Delta z_{\max,s}$, $\Delta z_{\max,f}$ et $E_{\text{élec}}$, et tel que :

$$\Phi_p = M(\Delta z_{\max,s}, \Delta z_{\max,f}, E_{\text{élec}})$$

Dans cet exemple et en reprenant la terminologie définie plus haut, la grandeur Φ représente le résultat R . Le modèle M prend en compte les trois grandeurs
 30 observables $\Delta z_{\max,s}$, $\Delta z_{\max,f}$ et $E_{\text{élec}}$, mais il pourrait en prendre d'autres et il pourrait faire intervenir une ou plusieurs valeurs de consigne telles que I_c , F_c , Δt_s et Δt_f . Il est important, cependant, de noter que le modèle prend en compte au moins deux

variables indépendantes dont au moins une grandeur observable, ce qui est nécessaire pour évaluer Φ_p . En effet, la prise en compte d'une seule des ces grandeurs mesurables, éventuellement complétée par la prise en compte d'une ou plusieurs consignes, ou la seule prise en compte des consignes, ne permet pas d'évaluer Φ_p avec suffisamment de précision.

Comme cela a été indiqué précédemment, le pilotage du processus de soudage par points consiste à déterminer, après chaque réalisation d'une soudure, les consignes à appliquer pour réaliser la soudure suivante de façon satisfaisante. Plus particulièrement, cela consiste à déterminer la consigne d'intensité de courant I_c pour que le diamètre du bouton de soudage soit satisfaisant, c'est-à-dire compris entre les deux valeurs Φ_{\min} et Φ_{\max} définis plus haut, et pour cela que la consigne de courant I_c se situe à l'intérieur du domaine de soudabilité.

Pour cela, pour chaque opération de soudage :

- on enregistre les paramètres observables nécessaires pour déterminer les grandeurs observables utilisées par le modèle M ; dans le cas présent ce sont $\Delta z_{\max,s}$, $\Delta z_{\max,f}$ et E_{elec} ,
- à l'aide du modèle M, on calcule l'estimation du résultat R_{es} , égal, dans le cas présent, au diamètre du bouton de soudure : $R_{\text{es}} = \Phi_p = M(\Delta z_{\max,s}, \Delta z_{\max,f}, E_{\text{elec}})$,
- à l'aide d'une loi de commande L ayant pour variable d'entrée au moins R_{es} , on calcule la consigne de courant I_c pour l'opération de soudage suivante : $I_c = L(R_{\text{es}})$,
- et on effectue l'opération de soudage suivante en utilisant la nouvelle consigne d'intensité.

Plusieurs lois de commande sont possibles. En particulier, on peut utiliser la loi de commande L définie de la façon suivante:

- on choisit une valeur minimale Φ_{\min} et une valeur maximale Φ_{\max} pour le diamètre du bouton de soudage,
- on choisit un nombre q_m ,
- on effectue la moyenne glissante Φ_{mg} de q_m dernières prédictions du diamètre Φ du bouton de soudage,

- si $\Phi_{mg} > \Phi_{max}$, on diminue la consigne I_c d'intensité de soudage, si $\Phi_{min} \leq \Phi_{mg} \leq \Phi_{max}$ on ne modifie pas la consigne I_c d'intensité de soudage, si $\Phi_{mg} < \Phi_{min}$ on augmente la consigne I_c d'intensité de soudage.

On peut, en outre, fixer une valeur $\Phi_0 < \Phi_{min}$ et, si la dernière prédiction du diamètre du bouton de soudage Φ est inférieure à Φ_0 , on augmente la consigne I_c d'intensité de soudage.

Pour ajuster la consigne d'intensité, on fixe un incrément ΔI_c d'intensité de soudage, et lorsqu'on diminue ou on augmente la consigne I_c d'intensité de soudage, on soustrait ou on ajoute à I_c l'incrément ΔI_c .

Le modèle M est un modèle statistique construit à partir d'une base d'apprentissage B_{ap} constituée de l'ensemble des consignes, des grandeurs observables ainsi que des mesures du résultat, obtenues pour une série de N points de soudure. Il peut être validé sur une base de test B_{test} constituée de la même façon que la base d'apprentissage, mais avec des exemples différents de ceux qui constituent la base d'apprentissage.

Le modèle M est par exemple un réseau de neurones, mais peut être de tout type de modèle statistique.

On va maintenant décrire de façon générale la construction du modèle et son utilisation, puis on décrira les particularités de l'application au soudage par points.

Comme on l'a indiqué ci-dessus, la base d'apprentissage est constituée d'un ensemble de N observations, repérées par un indice i , choisies de façon à couvrir au mieux le champ des conditions possibles de réalisation du processus à mesurer.

A chaque observation i , on fait correspondre :

- le résultat R_i obtenu (mesuré),
- n variables x^i_1, \dots, x^i_n , correspondant aux valeurs des consignes et des grandeurs observables mesurées et qui constituent le vecteur x^i ; on peut noter que ces variables peuvent également correspondre à des grandeurs d'entrée qui, dans le cas du soudage par points peuvent être, par exemple, l'épaisseur et la nature des tôles à souder ; cependant, dans le cas présent, on considère que toutes les observations sont faites avec des tôles identiques.

De la même façon, la base de test est composée de N observations pour chacune desquelles, on fait correspondre les valeurs mesurée de R et des n variables x_1, \dots, x_n , qui constituent le vecteur x .

Le modèle M est une fonction de forme adéquate, que l'homme du métier sait choisir en fonction du type de modèle qu'il veut utiliser ; ce peut être un polynôme des n variables x_1, \dots, x_n , ou un réseau de neurones comportant au moins un neurone non linéaire et dépendant des mêmes variables. Cette fonction dépend de paramètres $\theta_1, \dots, \theta_q$, qui constituent un vecteur θ . Elle permet de calculer une estimation du résultat $R_{\text{est}} = M(x; \theta)$ (ou de façon développée : $R_{\text{est}} = M(x_1, \dots, x_n; \theta_1, \dots, \theta_q)$). Ce modèle peut être ajusté sur la base d'apprentissage en recherchant le vecteur θ_a qui minimise le score S , noté également $S(M; B_{\text{ap}})$ lorsqu'il est calculé pour le modèle M sur la base d'apprentissage B_{ap} , égal à la somme, pour tous les points de la base d'apprentissage, des valeurs d'une fonction coût J qui est, par exemple, l'écart quadratique entre l'estimation faite par le modèle et le résultat effectivement mesuré :

$$J(x) = (R_{\text{est}} - R)^2 = (M(x; \theta) - R)^2$$

Cette fonction coût J est une fonction de la variable x qui dépend du vecteur paramètres θ , si bien qu'on peut l'écrire sous la forme $J(x_1, \dots, x_n; \theta_1, \dots, \theta_q)$.

On a alors :

$$S(M; B_{\text{ap}}) = \sum_{i=1, N} J(x^i) = \sum_{i=1, N} (R_{\text{est}, i} - R_i)^2$$

Les vecteurs x^1, \dots, x^N sont les vecteurs correspondant aux différents points de la base d'apprentissage B_{ap} . La recherche du vecteur θ_a peut être faite par toute méthode de minimisation du coût connue de l'homme du métier, telle que, par exemple, l'algorithme de quasi-Newton (décrite par exemple dans W.H. PRESS & al, « *Numerical Recipes in C: The art of Scientific Computing* » second Edition, Cambridge University Press, 1992) ou celui de Levenberg-Marquardt (décrit par exemple dans K. LEVENBERG, « *A Method for the Solution of Certain Non-linear Problems in Least Squares* », Quarterly Journal of Applied Mathematics II (2), pp. 164-168, 1944 et dans D.W. MARQUARDT « *An Algorithm for Least-squares Estimation of Non-linear Parameters* », Journal of the Society of Industrial and Applied Mathematics 11 (2), pp 431-441, 1963).

On obtient ainsi un modèle ajusté $M_a(\mathbf{x}; \theta_a)$. On peut tester un tel modèle sur la base de test B_{test} en calculant le score S qui est égal à la fonction coût, calculée pour les points de la base de test :

$$S(M_a; B_{\text{test}}) = \sum_{i=1, N'} F(\mathbf{x}^i); \mathbf{x}^1, \dots, \mathbf{x}^{N'} \text{ appartenant à } B_{\text{test}}$$

- 5 Ce score peut également, et de la même façon, être calculé sur la base d'apprentissage.

Cependant, pour un même type de modèle, on peut envisager des modèles comportant plus ou moins de paramètres. Par exemple, si le modèle est du type polynomial, on peut choisir un polynôme de degré 1 ou de degré supérieur. De même, si le modèle est du type réseau de neurones, on peut choisir un modèle comportant un ou plusieurs neurones. Le score d'un modèle dépend notamment du nombre de paramètres, et en particulier, lorsque ce nombre augmente, le score diminue, ce qui est souhaitable, car un modèle est d'autant meilleur que son score est faible, pour autant qu'il n'y ait pas sur-ajustement. En effet, les résultats de mesure qui constituent les bases d'apprentissage ou de test sont entachés d'erreurs qui introduisent un bruit aléatoire. En augmentant trop le nombre de paramètres, on peut obtenir un modèle dont le score sur la base d'apprentissage est nul, ce qui pourrait paraître idéal, mais qui, en réalité, est un défaut. En effet, un tel modèle prédit parfaitement non pas le phénomène à modéliser, mais ce phénomène auquel se rajoute le bruit qui a affecté la base d'apprentissage. Il en résulte que l'application d'un tel modèle à un point non contenu dans la base d'apprentissage donnera un résultat a priori entaché d'une erreur importante.

Par ailleurs, pour un même type de modèle, c'est-à-dire pour une forme algébrique et un nombre de paramètres donnés, la fonction de coût admet, dans le cas général, plusieurs minima, c'est à dire plusieurs vecteurs paramètres θ_a . A chacun de ces vecteurs paramètres correspond un modèle.

Afin de rechercher le meilleur modèle, c'est-à-dire celui qui aura le score le plus faible tout en n'étant pas affecté d'un sur-ajustement, on peut utiliser des méthodes connues en elles mêmes, telles que les méthodes dites de « validation croisée » ou de « régularisation ».

Mais ces méthodes sont à la fois lourdes et pas toujours suffisamment efficaces. Aussi, l'inventeur a imaginé une méthode nouvelle plus performante que les méthodes connues.

Pour mettre en œuvre cette méthode, on procède de la façon suivante :

- 5 - on choisit une structure de modèle dont le nombre de paramètres peut être choisi arbitrairement,
- on détermine comme indiqué ci-dessus un premier modèle ajusté comportant q_1 paramètres: $M_{a,1}(x; \theta_{a,1})$, dans lequel $\theta_{a,1}$ est un vecteur de dimension q_1 ,
- on calcule le jacobien Z du modèle $M_{a,1}(x; \theta_{a,1})$. Pour cela, on considère les
- 10 fonctions $M_{a,1}(x^i; \theta)$ dans lesquelles on considère que le vecteur paramètres θ du modèle est la variable. La matrice Z est alors la matrice ayant q_1 lignes et N colonnes dont les terme z_{ij} sont égaux à :

$$z_{ij} = \partial M_{a,1}(x^i; \theta) / \partial \theta_j \text{ au point } \theta = \theta_{a,1}$$

- on calcule ensuite, pour chaque observation i de B_{ap} le scalaire suivant, noté h_{ii} :
- 15
$$h_{ii} = (z_{i,1}, \dots, z_{i,q_1}) (Z'Z)^{-1} (z_{i,1}, \dots, z_{i,q_1})$$
- on calcule alors, sur la base d'apprentissage, un score généralisé du modèle ayant pour vecteur paramètres $\theta_{a,1}$:

$$E(\theta_{a,1}) = \sum_{i=1}^N [(M_{a,1}(x^i; \theta_{a,1}) - R_i) / (1 - h_{ii})]^2$$

et on calcule une grandeur $\mu(\theta_{a,1}) = (N \cdot q_1)^{-1/2} \sum_{i=1}^N h_{ii}^{1/2}$

- 20 - puis on détermine de la même façon des modèles ayant, au choix, des structures ou des nombres de paramètres différents, ou correspondant à différents minima d'une même fonction de coût. On obtient alors une série de modèles $M_{a,k}$ auxquels sont associés les grandeurs $E(\theta_{a,k})$ et $\mu(\theta_{a,k})$.
- en comparant les valeurs de $E(\theta_{a,k})$ et $\mu(\theta_{a,k})$, on détermine alors le modèle $M_{a,k}$
- 25 pour lequel $E(\theta_{a,k})$ est parmi les plus petites valeurs obtenues et $\mu(\theta_{a,k})$ est maximal. Ce modèle correspond au modèle optimal qu'on note $M_{a,opt}$. C'est ce modèle qui est alors utilisé pour effectuer la régulation du processus.

Pour déterminer le modèle optimal, on peut, par exemple, procéder de la façon suivante :

- 30 - on considère une pluralité de modèles $M_{a,k}$ pour lesquels on calcule les valeurs correspondantes de $E(\theta_{a,k})$ et $\mu(\theta_{a,k})$,

- on considère l'ensemble constitué par les valeurs des $E(\theta_{a,k})$, cet ensemble comporte une plus petite valeur $\min[E(\theta_{a,k})]$, et on retient au moins deux modèles dont les valeurs des $E(\theta_{a,k})$ sont les plus proches de $\min[E(\theta_{a,k})]$, pour cela on peut utiliser tout critère que l'homme du métier sait déterminer,
- 5 - on considère les modèles qui ont été sélectionnés comme indiqué, et parmi ces modèles, on retient celui pour lequel la valeur de $\mu(\theta_{a,k})$ est la plus grande ; ce modèle est le modèle considéré comme optimal.

Ainsi, on choisit le modèle ayant le plus grand $\mu(\theta_{a,k})$ parmi les modèles ayant les plus petits $E(\theta_{a,k})$.

- 10 On peut aussi, selon une méthode connue en elle-même, choisir un « comité de modèles » constitué d'une pluralité de modèles a priori acceptables, et, chaque fois que l'on veut faire une prévision, on utilise le comité de modèles pour déterminer la prévision la plus pertinente (voir par exemple CLEMEN, R.T. « *Combining forecasts: A review and annotated bibliography* », International Journal of Forecasting, Vol 5, pp 559-584, 1989).

15 Par la suite, on ne parlera que de « modèle », mais ce qui va être exposé pourra être transposé mutatis mutandis, par l'homme du métier, à un « comité de modèles ».

- 20 Le modèle ainsi obtenu n'est pas nécessairement satisfaisant, c'est en particulier le cas lorsque la base d'apprentissage ne contient pas assez de points ou lorsque ces points ne sont pas répartis de façon satisfaisante dans l'espace des entrées. Afin d'évaluer la qualité du modèle et éventuellement de l'améliorer, on peut utiliser la base de test. Pour cela, on procède de la façon suivante :

- on détermine a priori, par des essais préliminaires, un intervalle d'estimation de l'écart type du bruit de mesure $[\sigma_{\min}, \sigma_{\max}]$, pour la mesure du résultat R,
- 25 - on calcule alors le score du modèle $M_{a, \text{opt}}$ sur la base test : $S(M_{a, \text{opt}}; B_{\text{test}})$ et on compare ce score à l'intervalle $[\sigma_{\min}, \sigma_{\max}]$; si $\sigma_{\min} < S(M_{a, \text{opt}}; B_{\text{test}}) < \sigma_{\max}$, on considère que le modèle est satisfaisant ; dans le cas contraire, on enrichit la base d'apprentissage avec un ou plusieurs points pris dans la base de test et on recommence le calcul d'un modèle optimal.

- 30 Les exemples issus de la base test et introduits dans la base d'apprentissage peuvent être choisis de diverses façons. Mais il est préférable de choisir les points

pour lesquels l'intervalle de confiance de l'estimation du résultat R faite par le modèle est le plus grand, c'est-à-dire pour lesquels cette estimation est la plus incertaine. Cet intervalle de confiance du point i, qu'il appartienne à la base d'apprentissage ou à la base de test, est déterminé par le coefficient h_i défini précédemment. Plus précisément, il est proportionnel à $h_i^{1/2}$. Cet ajustement, ou recalage du modèle, peut être fait en cours d'exécution du processus, en faisant des temps en temps des mesures du résultat de façon à constituer une base de test à l'aide de laquelle on évalue les performances du modèle et, si nécessaire, on enrichit la base d'apprentissage afin de recalculer un modèle plus performant.

Dans le cas particulier du soudage par points, selon l'invention :

- par des essais préliminaires on construit une première base d'apprentissage et on évalue, par des essais de reproductibilité de la mesure, l'intervalle de dispersion de l'écart type du bruit de mesure $[\sigma_{\min}, \sigma_{\max}]$, pour la mesure du diamètre du bouton de soudage (le résultat R). Cette base d'apprentissage est construite en réalisant des séries de points de soudure avec des intensités de soudage variant de façon alternative entre la limite inférieure de soudabilité et la limite supérieure de soudabilité, sans faire varier les autres consignes que sont le temps de soudage, le temps de forgeage et la force de soudage. Ceci permet de construire un modèle qui servira à piloter le soudage sans faire varier la durée d'un cycle, c'est-à-dire en conservant une productivité constante.
- on considère un modèle statistique, et, de préférence, un modèle neuronal, ayant pour variable d'entrée les grandeurs observables définies plus haut, et pour sortie, l'estimation du diamètre du bouton de soudage. A l'aide de la base d'apprentissage, et en appliquant par exemple la méthode qui vient d'être définie, on optimise le modèle. Les inventeurs ont constaté qu'un bon modèle est notamment un modèle dont les variables d'entrée sont $\Delta z_{\max,s}$, $\Delta z_{\max,f}$ et E_{elec} , comme indiqué ci-dessus,
- pour réguler le processus, on utilise le modèle comme cela est indiqué plus haut, afin de réactualiser, si nécessaire, la consigne de soudage Ic après chaque réalisation d'un point de soudure,

En outre, et afin d'améliorer le modèle, on peut, tout au long de l'exploitation du processus, prélever des échantillons de tôles soudées et mesurer le diamètre du

bouton de soudure de façon à constituer une base de test. A l'aide de cette base de test, on calcule le score du modèle ; si ce score est satisfaisant, on ne modifie pas le modèle ; si ce score n'est pas satisfaisant, on extrait de la base de test les points pour lesquels la prédiction est la plus incertaine, c'est-à-dire dont l'intervalle de confiance est supérieur à une valeur S_k fixée à l'avance, et on introduit ces points dans la base d'apprentissage pour l'enrichir. Avec cette base d'apprentissage enrichie, on recalcule un modèle optimisé et on poursuit la régulation du processus avec ce nouveau modèle. Comme on le comprendra aisément, l'application du procédé qui vient d'être décrit ne se limite pas au cas du soudage par points, mais il s'applique à tout processus qui peut faire l'objet d'une modélisation.

Que ce soit dans le cas général ou dans celui du soudage par points, le procédé est mis en œuvre par un ordinateur relié à des capteurs et à un module de commande du processus. Cet ordinateur comporte des programmes destinés à calculer le modèle optimal à partir de fichiers dans lesquels sont enregistrés les données relatives aux bases d'apprentissage et de test, des programmes destinés à utiliser le modèle optimal à partir de données mesurées sur le processus, à calculer les consignes à partir de la loi de commande, et à envoyer ces consignes à l'équipement destiné à réaliser le processus. L'homme du métier sait réaliser un tel automatisme.

Dans le cas particulier du soudage par points, l'équipement destiné à réaliser le processus est une machine de soudage par points connue en elle-même et comportant, également de façon connue, des moyens de mesure de la position des électrodes, de la force, de l'intensité et de la tension instantanées, ainsi que des moyens de commande. Ces moyens sont reliés de façon connue à l'ordinateur, soit directement soit par l'intermédiaire d'automates particuliers connus en eux-mêmes.

REVENDEICATIONS

✓ 1 - Procédé de contrôle et de commande d'un processus technique s'exécutant dans le temps, soit de façon continue soit de façon discontinue, en appliquant à chaque instant t des consignes $\{C_1(t), \dots, C_n(t)\}$, conduisant à un résultat $R(t)$ mesurable mais non observable et engendrant une pluralité de grandeurs observables distinctes du résultat $R(t)$ dont au moins deux sont indépendantes $\{G_1(t), \dots, G_m(t)\}$, caractérisé en ce que :

- on mesure au moins deux grandeurs observables indépendantes $G_1(t), \dots, G_p(t)$,
- à l'aide d'un modèle prédictif M , ou d'un comité de modèles, dont les variables comportent les au moins deux grandeurs observables indépendantes, on calcule une estimation $R_{es}(t) = M(G_1(t), \dots, G_p(t))$ du résultat $R(t)$,
- à l'aide d'une loi de commande L , dont la variable d'entrée est le résultat estimé $R_{es}(t)$, on calcule de nouvelles consignes $\{C_1(t+1), \dots, C_n(t+1)\} = L(R_{es}(t))$ applicables pour l'instant $t+1$,
- et on remplace les consignes $\{C_1(t), \dots, C_n(t)\}$ par les consignes $\{C_1(t+1), \dots, C_n(t+1)\}$,

2 - Procédé selon la revendication 1 caractérisé en ce que le modèle prédictif M est un modèle d'ajustement statistique dépendant de paramètres $\{\theta_1, \dots, \theta_p\}$ constituant un vecteur paramètres θ ajustés sur une base d'apprentissage B_{ap} constituée de l'ensemble des consignes, des mesures des grandeurs observables et de la mesure du résultat pour une pluralité d'exécutions successives du processus technique.

3 - Procédé selon la revendication 2 caractérisé en ce que pour déterminer le modèle M :

- on choisit une structure de modèle dépendant d'un vecteur paramètre θ ,
- on choisit une fonction de coût J ayant par exemple une forme quadratique,
- avec la base d'apprentissage, on calcule une succession de modèles ajustés $M_{a,k}$ correspondant à différents vecteurs paramètre θ_k de dimension q_k qui minimisent, globalement ou localement, la fonction coût sur la base d'apprentissage,
- pour chaque modèle $M_{a,k}$, on calcule les coefficients h_k de chacun des exemples de la base d'apprentissage, et on calcule le score généralisé du modèle $M_{a,k}$:

$$E(\theta_{a,k}) = \sum_{i=1,N} [(M_{a,k}(x^i; \theta_{a,k}) - R_i) / (1 - h_i)]^2$$

- et on calcule une grandeur $\mu(\theta_{a,k}) = (N.q_k)^{-1/2} \sum_{i=1}^N h_i^{1/2}$ et on choisit le modèle $M_{a,k}$ ayant le plus grand $\mu(\theta_{a,k})$ parmi les modèles ayant les plus petits $E(\theta_{a,k})$, ce modèle est le modèle optimal $M_{a,opt}$.

5

4 – Procédé selon la revendication 2 ou 3 caractérisé en ce que :

- on détermine pour la mesure du résultat R un intervalle de dispersion de l'écart type du bruit de mesure $[\sigma_{min}, \sigma_{max}]$,
- et on ajuste les paramètres $\{\theta_1, \dots, \theta_p\}$ du modèle prédictif M de telle sorte que, sur une base de test B_{test} , il ait un score $S = S(M; B_{test})$ tel que $\sigma_{min} < S < \sigma_{max}$, la base de test étant constituée de l'ensemble des consignes, des mesures des grandeurs observables et de la mesure du résultat pour une pluralité d'exécutions successives du processus technique.

10

15

5 – Procédé selon la revendication 3 caractérisé en ce que pour ajuster les paramètres $\{\theta_1, \dots, \theta_p\}$ du modèle prédictif M, on choisit une première base d'apprentissage B_{ap} et une première base de test B_{test} , à l'aide de ladite première base d'apprentissage on détermine une première estimation des paramètres $\{\theta_1, \dots, \theta_p\}$, de telle sorte que le score du modèle M pour la base d'apprentissage soit compris dans l'intervalle $[\sigma_{min}, \sigma_{max}]$, puis, en utilisant dans le modèle M cette première estimation des paramètres, à l'aide de la première base de test B_{test} , on évalue le score $S = S(M; B_{test})$ qu'on compare à l'intervalle de dispersion $[\sigma_{min}, \sigma_{max}]$, si S est à l'intérieur dudit intervalle, on considère que l'estimation des paramètres est satisfaisante, dans le cas contraire, on complète la base

20

25

d'apprentissage B_{ap} avec des exemples issus de la première base de test pour constituer une nouvelle base d'apprentissage, éventuellement on complète la base de test et on détermine à nouveau les paramètres $\{\theta_1, \dots, \theta_p\}$ à l'aide de la nouvelle base d'apprentissage et le score S sur la nouvelle base de test et on poursuit les itérations jusqu'à ce que le score S soit compris dans l'intervalle de dispersion $[\sigma_{min}, \sigma_{max}]$.

30

6 – Procédé selon la revendication 5 caractérisé en ce que, pour compléter la base d'apprentissage avec des exemples issus de la base de test :

- on fixe un seuil d'intervalle de confiance S_k , pour les prédictions du modèle
- on calcule l'intervalle de confiance I_k de la prédiction du modèle M pour chacun des exemples de la base de test,
- et on introduit dans la base d'apprentissage au moins un des exemples de la base de test dont l'intervalle de confiance I_k est supérieur à S_k , c'est-à-dire dont l'estimation du résultat est la plus incertaine.

7 – Procédé selon la revendication 5 caractérisé en ce que, l'intervalle de confiance I_k de la prédiction du modèle M pour chaque exemple de la base de test est proportionnel à la racine carrée du coefficient h_{ij} de cet exemple.

8 - Procédé selon l'une quelconque des revendications 4 à 7 caractérisé en ce que, au cours de l'exploitation du processus technique, on mesure au moins un résultat et les grandeurs observables correspondantes, de façon à déterminer au moins un exemple supplémentaire qu'on ajoute à la base d'apprentissage et avec la nouvelle base d'apprentissage ainsi obtenue, on ajuste les paramètres du modèle et on évalue la performance du modèle.

9 – Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 8 caractérisé en ce que le modèle M est un réseau de neurones.

10 - Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 9 caractérisé en ce que le processus technique est le soudage par points de tôles.

11 – Procédé selon la revendication 10 caractérisé en ce que le résultat R est le diamètre Φ du bouton de soudage, ou toute autre grandeur comparable, telle que, par exemple, la force d'arrachement du bouton de soudage, et les consignes C_1, \dots, C_n sont la force de soudage F_s , l'intensité de soudage I_s , le temps de soudage Δt_s et le temps de forgeage Δt_f .

12 - Procédé selon la revendication 11 caractérisé en ce que les grandeurs observables sont l'énergie électrique totale $E_{\text{élec}}$, la dilatation maximale en cours de soudage $\Delta z_{\text{max},s}$ et la contraction maximale pendant la phase de forgeage $\Delta z_{\text{max},f}$.

5 13 - Procédé selon la revendication 11 ou la revendication 12 caractérisé en ce que la loi L est définie de la façon suivante:

- on choisit une valeur minimale Φ_{\min} et une valeur maximale Φ_{\max} pour le diamètre du bouton de soudage,
- on choisit un nombre q_m ,
- 10 - on effectue la moyenne glissante Φ_{mg} de q_m dernières prédictions du diamètre du bouton de soudage Φ ,
- si $\Phi_{mg} > \Phi_{\max}$, on diminue la consigne I_c d'intensité de soudage, si $\Phi_{\min} \leq \Phi_{mg} \leq \Phi_{\max}$ on ne modifie pas la consigne I_c d'intensité de soudage, si $\Phi_{mg} < \Phi_{\min}$ on augmente la consigne I_c d'intensité de soudage.

15

14 - Procédé selon la revendication 13 caractérisé en ce que l'on fixe en outre une valeur $\Phi_0 < \Phi_{\min}$ et, si la dernière prédiction du diamètre du bouton de soudage Φ est inférieure à Φ_0 , on augmente la consigne I_c d'intensité de soudage.

20 15 - Procédé selon la revendication 13 ou la revendication 14 caractérisé en ce que on fixe un incrément ΔI_c d'intensité de soudage, et, lorsqu'on diminue ou on augmente la consigne I_c d'intensité de soudage, on soustrait ou on ajoute à I_c l'incrément ΔI_c .

25 16 - Procédé selon l'une quelconque des revendications 10 à 15 caractérisé en ce que pour construire la base d'apprentissage, on réalise une succession de points de soudure en faisant varier alternativement la consigne d'intensité de soudage I_c entre la borne inférieure et la borne supérieure de l'intervalle de soudabilité et usant ainsi les électrodes de soudage, les autres consignes étant maintenues constantes.

30

17 - Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 16 caractérisé en ce qu'il est mis en œuvre par un ordinateur.

1/3

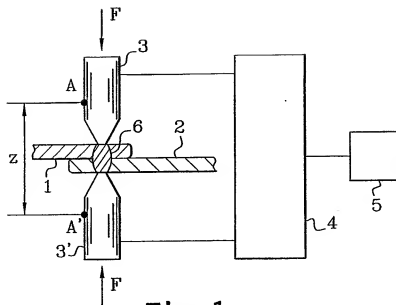


Fig. 1

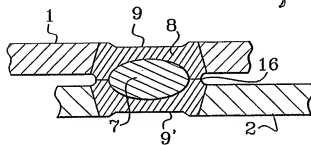


Fig. 2

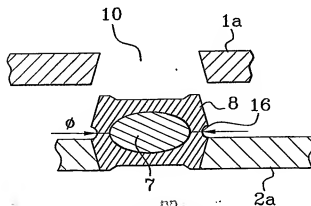
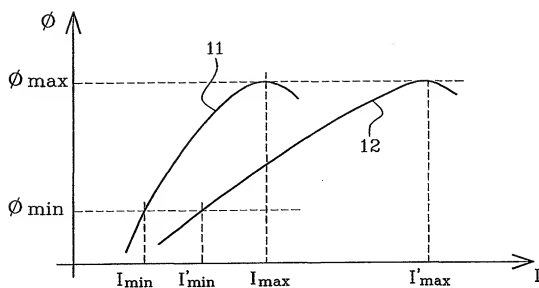
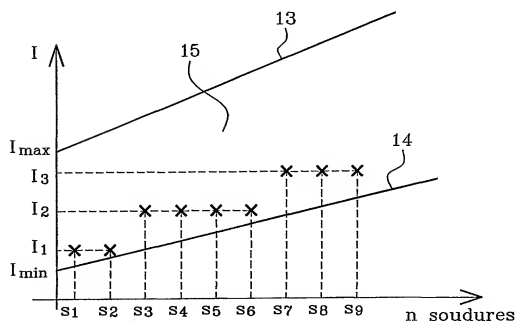
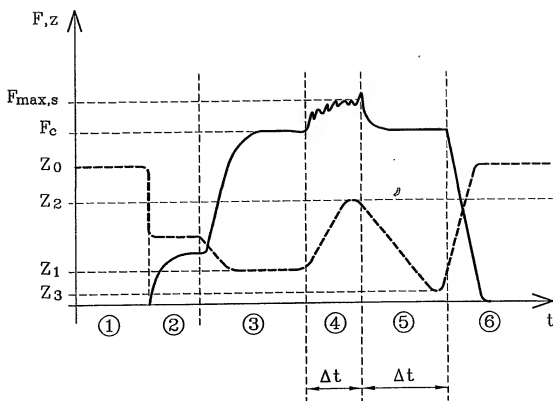


Fig. 3

2/3

Fig. 4Fig. 5

3/3

**Fig. 6**

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

National Application No

PCT/FR 02/00516

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

IPC 7 G05B13/02 G05B13/04

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 G05B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 4 639 853 A (RAKE HEINRICH ET AL) 27 January 1987 (1987-01-27)	1,17
Y	column 5, line 37 -column 7, line 7	9,10
Y	US 5 859 773 A (LIANO KADIR ET AL) 12 January 1999 (1999-01-12)	9
	figure 1	
Y	US 4 861 960 A (BERNSTEIN BRUCE M ET AL) 29 August 1989 (1989-08-29)	10
	figure 1	



Further documents are listed in the continuation of box C.



Patent family members are listed in annex.

* Special categories of cited documents:

A document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

E earlier document but published on or after the international filing date

L document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

O document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

P document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

T later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

X document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

Y document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.

Z document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

13 May 2002

Date of mailing of the international search report

22/05/2002

Name and mailing address of the ISA/

European Patent Office, P.B. 5618 Patentlaan 2

NL - 2280 HV Rijswijk

Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,

Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Kelperis, K

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

national Application No

rLT/FR 02/00516

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 4639853	A	27-01-1987	AT 48709 T 15-12-1989
			AU 554017 B2 07-08-1986
			AU 2896084 A 06-12-1984
			BR 8402695 A 07-05-1985
			CA 1208341 A1 22-07-1986
			DE 3418501 A1 06-12-1984
			EP 0128491 A2 19-12-1984
			JP 1938984 C 09-06-1995
			JP 6068691 B 31-08-1994
			JP 60041101 A 04-03-1985
			KR 8903114 B1 22-08-1989
US 5859773	A	12-01-1999	US 5559690 A 24-09-1996
			US 5353207 A 04-10-1994
			US 6363289 B1 26-03-2002
			AU 4411493 A 04-01-1994
			CA 2137806 A1 23-12-1993
			DE 69321952 D1 10-12-1998
			DE 69321952 T2 01-07-1999
			EP 0645025 A1 29-03-1995
			JP 9506986 T 08-07-1997
			WO 9325943 A2 23-12-1993
US 4861960	A	29-08-1989	NONE

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

nde internationale No
rci/FR 02/00516

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE
CIB 7 G05B13/02 G05B13/04

Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)

CIB 7 G05B

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si réalisable, termes de recherche utilisés)

EPO-Internal

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie *	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	US 4 639 853 A (RAKE HEINRICH ET AL) 27 janvier 1987 (1987-01-27)	1,17
Y	colonne 5, ligne 37 -colonne 7, ligne 7	9,10
Y	US 5 859 773 A (LIANO KADIR ET AL) 12 janvier 1999 (1999-01-12)	9
	figure 1	
Y	US 4 861 960 A (BERNSTEIN BRUCE M ET AL) 29 août 1989 (1989-08-29)	10
	figure 1	

☐ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents

☒ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

* Catégories spéciales de documents cités:

- *A* document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent
- *E* document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date
- *L* document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)
- *O* document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens
- *P* document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

T document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention

X document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré solement

Y document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier

Z document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée

13 mai 2002

Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale

22/05/2002

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale

Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax (+31-70) 340-3016

Fonctionnaire autorisé

Kelperis, K

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Indice Internationale No

PLI/FR 02/00516

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 4639853	A	27-01-1987	AT 48709 T 15-12-1989
			AU 554017 B2 07-08-1986
			AU 2896084 A 06-12-1984
			BR 8402695 A 07-05-1985
			CA 1208341 A1 22-07-1986
			DE 3418501 A1 06-12-1984
			EP 0128491 A2 19-12-1984
			JP 1938984 C 09-06-1995
			JP 6068691 B 31-08-1994
			JP 60041101 A 04-03-1985
			KR 8903114 B1 22-08-1989
US 5859773	A	12-01-1999	US 5559690 A 24-09-1996
			US 5353207 A 04-10-1994
			US 6363289 B1 26-03-2002
			AU 4411493 A 04-01-1994
			CA 2137806 A1 23-12-1993
			DE 69321952 D1 10-12-1998
			DE 69321952 T2 01-07-1999
			EP 0645025 A1 29-03-1995
			JP 9506986 T 08-07-1997
			WO 9325943 A2 23-12-1993
US 4861960	A	29-08-1989	AUCUN